

## **Einfluss von Rissen in hydrophobiertem Beton auf den kapillaren Wassertransport**

**P. Lunk<sup>1</sup> und F.H. Wittmann<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>MBT (Schweiz) AG, Zürich

<sup>2</sup>Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Zürich

### **Zusammenfassung**

Das Hydrophobieren von Stahlbeton hat sich als wirkungsvolle Oberflächenschutzmassnahme gegenüber einer kapillaren Wasseraufnahme und einem Tausalzangriff in der Praxis durchgesetzt. Das Entstehen von Rissen ist auch in einem hydrophobierten Beton nicht vollständig auszuschliessen und kann deshalb zu Schäden führen. In Aufsaugversuchen an Laborprobekörpern werden die massgebenden Einflüsse von Rissen auf das Aufsaugverhalten von Wasser bestimmt und quantifiziert. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die kapillare Wasseraufnahme von der Rissweite und der Hydrophobierungstiefe abhängig ist. Es existiert eine „kritische“ Rissweite in Abhängigkeit von der Hydrophobierungstiefe, welche zu einem partiellen Versagen der hydrophobierenden Wirkung führt.

**Stichwörter:** Hydrophobierung, kapillares Saugen, kritische Rissweite, Dauerhaftigkeit

### ***Influence of cracks in water repellent concrete on capillary water movement***

#### **Abstract**

*In practice, hydrophobing impregnation has been established as an effective surface protection system against water and de-icing salt attack. Cracks in concrete, whether impregnated by a hydrophobing treatment or not, are unavoidable and can therefore lead to damage. In absorption tests on laboratory samples, the significant influences of cracks on the penetration behaviour of capillary water have*

*been determined and quantified. The experimental results show that the water uptake depends on the crack width and the penetration depth of the hydrophobing agent. There exists a 'critical' crack width depending on the penetration depth of the hydrophobing agent which can maintain the hydrophobing behaviour. Finally practical conclusions of the present work are drawn.*

**Keywords:** Hydrophobing treatment, capillary suction, critical crack width, durability



**Dr. P. Lunk**, Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig. Von 1988 bis 1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der ETH Zürich. Von 1994 bis 1995 Projektleiter in einem Ingenieurbüro. Seit 1995 Mitarbeiter der MBT (Schweiz) AG, seit 1998 als Geschäftsführer. 1997 Promotion an der Abteilung für Bauingenieurwesen ETH Zürich. Er befasst sich vorwiegend mit Fragen der Betontechnologie sowie mit Fragen zu Bautenschutz und Instandsetzung.



**Prof. Dr. F.H. Wittmann**, WTA-Mitglied, studierte zunächst an den Universitäten Karlsruhe und München Physik, 1969 habilitierte er bei Prof. H. Rüschi an der TU München. Seit 1976 ist er ordentlicher Professor für Werkstoffe des Bauwesens, zuerst in Delft, dann in Lausanne und heute an der ETH in Zürich. Er befasst sich vorwiegend mit Fragen der Dauerhaftigkeit zementgebundener Werkstoffe und der Anwendung der Bruchmechanik im Bauwesen.

## **1 Einleitung**

Das Hydrophobieren von exponierten Stahlbetonbauteilen hat sich in der Praxis in den letzten Jahren als eigenständige Oberflächenschutzmassnahme gegenüber dem Eindringen von Tausalz bewährt. Der Einfluss einer Hydrophobierung auf das Eindringen von Chloriden in Beton wurde in einer Reihe von Untersuchungen dargestellt [1-6]. Wittmann und Müller [6] haben in einer Bestandsaufnahme an 28 hydrophobierten Objekten die Wirksamkeit einer Hydrophobierung systematisch untersucht und Massnahmen für die Praxis hinsichtlich einer Verbesserung der Langzeitbeständigkeit einer Hydrophobierung formuliert. Anforderungen an eine Hydrophobierung sind in unterschiedlichen nationalen und internationalen Normen festgelegt [7,8].

Beschädigungen oder Rissen kommt auch bei der Verwendung einer Hydrophobierung eine besondere Bedeutung zu. Schmidt [9] berichtet über das erfolgreiche Inaktivieren der Saugfähigkeit von Trennrissen an Galerien und Brückenstützen durch Hydrophobieren der Risse. Es gibt nur wenige Untersuchungen über Risse im oberflächennahen Bereich eines hydrophobierten Bauteiles [10-12]. Franke und Bentrup [10] haben dabei den Einfluss von Rissen auf die Schlagregensicherheit bei einem hydrophobierten Mauerwerk untersucht. Sie fanden, dass die hydrophobierende Wirkung erhalten bleibt, wenn die Rissweiten 0.2 mm bis 0.5 mm über die gesamte Nutzungsdauer nicht überschreiten.

In diesem Bericht werden neue Untersuchungen zum Aufsaugverhalten von hydrophobiertem, gerissenen Stahlbeton vorgestellt [13,14]. Der Einfluss von Rissen in hydrophobiertem Beton wurde nach der folgenden Fragestellung untersucht:

- Existiert eine „kritische“ Rissweite bei hydrophobiertem Beton, die, wenn sie überschritten wird, zu einem partiellen Versagen der hydrophobierenden Wirkung führt und damit die Dauerhaftigkeit des Betons verringert?

## **2 Experimentelle Untersuchungen**

Die Untersuchungen wurden an bewehrten Betonproben mit Rissen durchgeführt. Dabei wurde ein Standardbeton mit Portlandzement als Bindemittel und einem w/z-Wert von 0.50 verwendet (Tabelle 1). Es wurden Balken mit Stahlschlaufen

**Tabelle 1:** Zusammensetzung des Standardbetons

w/z-Wert [-]	Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Zuschlagesgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]
0.50	350	175	1887

hergestellt, die nach 2 Tagen ausgeschalt und bis zum 7. Tag mit nassen Jutesäcken und Folien abgedeckt wurden. Anschliessend wurden sie im Scheiben mit den Abmessungen  $50 \cdot 300 \cdot 150 \text{ mm}^3$  geschnitten und lagerten danach bis zum 28. Tag im Klima  $20^\circ\text{C}/70\% \text{ r.F.}$  gelagert.

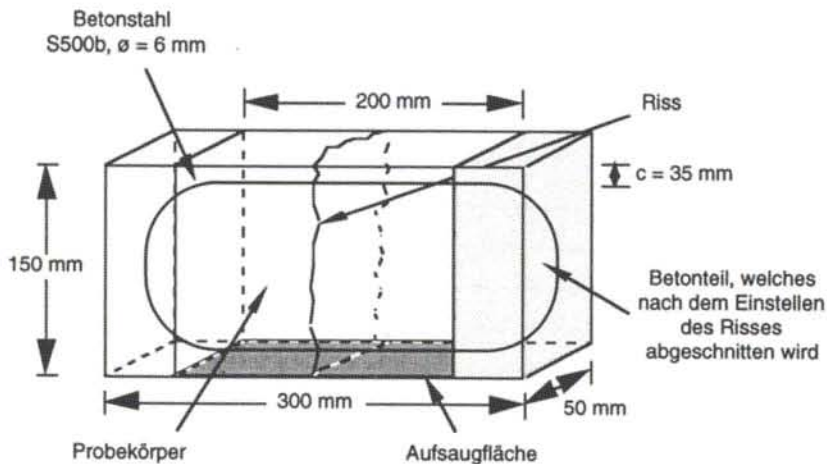
Jede Scheibe mit den Abmessungen von  $50 \cdot 300 \cdot 150 \text{ mm}^3$  war bewehrt mit einer Stahlschlaufe, Betonstahl S500b,  $\varnothing = 6 \text{ mm}$ . 6 Wochen nach dem Herstellen der Proben wurde eine geschalte Betonoberfläche  $300 \cdot 50 \text{ mm}$  hydrophobiert. Dabei wurden 3 unterschiedliche Hydrophobierungsmittel eingesetzt. Der Auftrag erfolgte dreimal nass-in-nass (Kontaktzeit  $3 \cdot 1 \text{ Minute}$ ). Zum Ausreagieren der Wirkstoffsubstanzen lagerten die Proben für weitere 28 Tage im Klima  $20^\circ\text{C}/70\% \text{ r.F.}$  Die Eigenschaften der verwendeten Hydrophobierungsmittel sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die hydrophobierten Betonscheiben wurden in einer elektromechanischen Prüfmaschine eingebaut. Danach wurde ein Dreipunkt-Biegezug-Versuch durchgeführt. Dabei wurden die Probekörper in der hydrophobierten Oberfläche vorsichtig angerissen, um nur einen Riss in der hydrophobierten Oberfläche zu erzeugen. Anschliessend wurde die Probe entlastet und die verbleibende Rissweite wurde festgehalten. An den beiden Seitenflächen des Probekörper wurden danach über dem Riss induktive Wegaufnehmer am Zugrand der Probe und in der Ebene der Bewehrung befestigt. Durch zyklische Belastung und Entlastung wurde die gewünschte Rissweite unter Berücksichtigung der Rissweite aus der Vorbelastung eingestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Probenvorbereitung ist in [13] gegeben.

Um den Einfluss von Rissen auf das Aufsaugverhalten zu untersuchen, wurden Standardaufsaugversuche durchgeführt. Dazu wurden die Betonscheiben nochmals zugeschnitten. Die Aufsaugfläche war  $50 \cdot 200 \text{ mm}^2$ . Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels wurde an den abgeschnittenen Betonstücken bestimmt. Dazu wurden die abgeschnittenen Betonstücke 24 Stunden getrocknet, anschliessend wurden die Schnittflächen mit Wasser besprüht. Die hydrophobierte Teilfläche der Schnittfläche zeichnet sich dabei hell ab, während die wasseraufnehmende Teilfläche der Schnittfläche dunkel erscheint. Der helle Bereich wurde optisch für beide

**Tabelle 2:** Eigenschaften der verwendeten Hydrophobierungsmittels

Nr. [-]	Wirkstoff des Hydrophobie- rungsmittels [-]	Aktiver Wirkstoff- gehalt [%]	Mittlere Eindring- tiefe s [-]
1	Siloxan	7,5	2,5
2	Silan	40	5,0
3	Silan	100	7,5



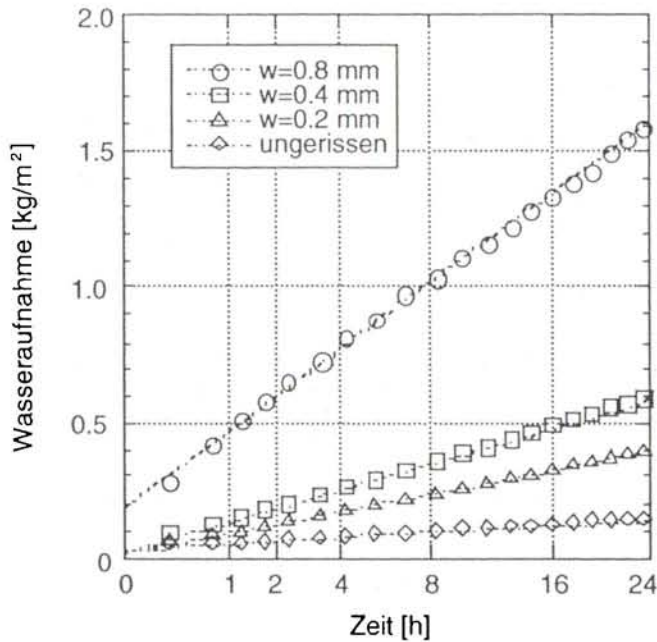
**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Abmessungen des bewehrten Probekörpers

Schnittflächen vermessen und der Mittelwert aus den Teilergebnissen gebildet. In Abbildung 1 sind die Abmessungen des bewehrten Probekörpers schematisch dargestellt.

Nach der Probenvorbereitung wurden alle Flächen der Probe mit Ausnahme der hydrophobierten Oberfläche und der ihr gegenüberliegenden Fläche zweimalig mit Zwei-Komponenten-Epoxidharz beschichtet. Damit wurde ein vorwiegend eindimensionaler Wassertransport gewährleistet und eine Verdunstung über die Seitenflächen verhindert. Die Standardaufsugversuche wurden während 24 Stunden durchgeführt. Die Probekörper wurden dabei 2 mm tief in Leitungswasser eingetaucht. Die Wasseraufnahme wurde gravimetrisch als Funktion der Zeit an drei Parallelproben kontinuierlich bestimmt. Dazu wurde ein Prüfstand entwickelt, mit dem eine computerunterstützte Messdatenerfassung möglich wurde. Während der gesamten Versuchsdauer von 24 Stunden wurden 60 Messwerte aufgenommen. Eine detaillierte Beschreibung der Messtechnik ist in [15] gegeben.

### 3 Ergebnisse

Der Einfluss der Rissweite auf den kapillaren Wassertransport wurde an hydrophobiertem Standardbeton mit „realen“ Biegerissen untersucht. Dazu wurden gerissene, hydrophobierte Betonproben mit Rissweiten von 0.2 mm, 0.4 mm und 0.8 mm hergestellt. Die Risstiefe betrug bei allen untersuchten Betonproben zwischen 130 mm und 150 mm. Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels betrug 2.5 mm, 5.0 mm und 7.5 mm. In den Abbildungen 2–4 sind die Ergebnisse der Massenzunahme als Funktion der Zeit im Wurzelmassstab für die hydrophobierten Betone mit Rissen sowie für den ungerissenen Zustand dargestellt. Die Massen-

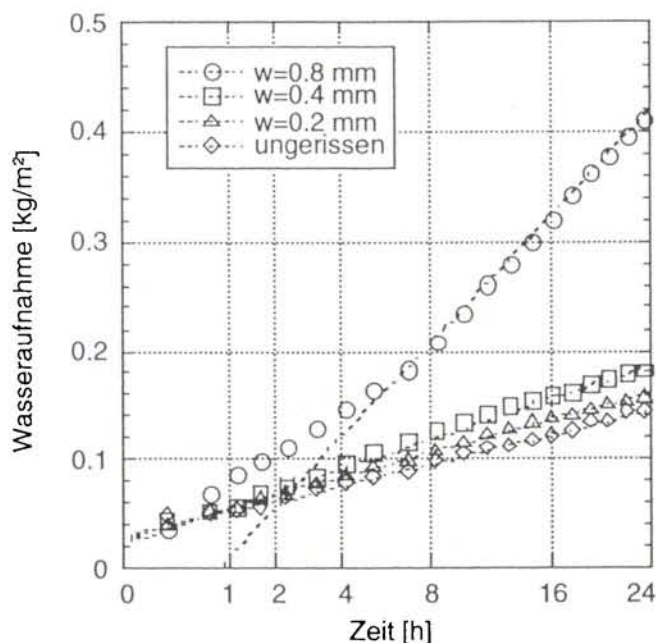


**Abbildung 2:** Wasseraufnahme als Funktion der Zeit für hydrophobierten Beton mit Biegerissen unterschiedlicher Rissweite und für ungerissenen, hydrophobierten Beton; Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels  $s = 2.5$  mm

zunahmen wurde dabei auf die Grundfläche der Probekörper bezogen. Die einzelnen Messwerte sind dabei Mittelwerte aus 3 Messungen und werden durch unterschiedliche Symbole dargestellt. Die gepunktete Linie wird durch lineare Regression der Messpunkte gemäss DIN 52617 [16] berechnet.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die kapillare Wasseraufnahme von der Rissweite und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels abhängig ist. Grundsätzlich wird eine grössere Wasseraufnahme mit zunehmender Rissweite und abnehmender Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels beobachtet. Bei gerissem, hydrophobierten Beton mit Rissweiten  $w > 0.2$  mm und mit einer Hydrophobierungstiefe von 2.5 mm wird eine drastische Zunahme der Wasseraufnahme im Vergleich zum ungerissenen, hydrophobierten Beton festgestellt. Die Wasseraufnahme des hydrophobierten Betons mit einer Rissweite von 0.8 mm ist vergleichbar mit dem entsprechenden unhydrophobierten und ungerissenen Beton. Bei einer Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von 7.5 mm ist über einen Zeitraum von 24 Stunden kein signifikanter Einfluss auf die Wasseraufnahme von Biegerissen mit Rissweiten von 0.2-0.8 mm gegenüber ungerissem Beton feststellbar. Ein ähnlicher Sachverhalt wird auch für eine Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von 5.0 mm beobachtet. Bis zu einer Rissweite von 0.4 mm wird auch hierbei kein signifikanter Einfluss auf die Wasseraufnahme festgestellt.



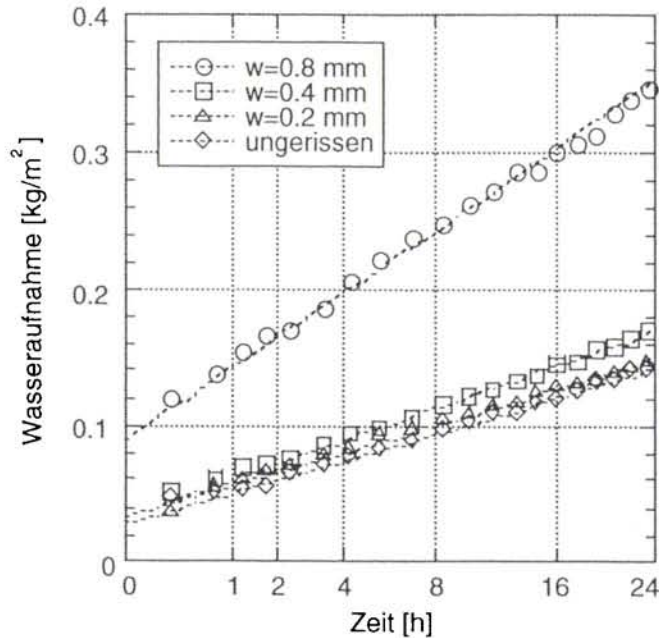


**Abbildung 3:** Wasseraufnahme als Funktion der Zeit für hydrophobierten Beton mit Biegrissen unterschiedlicher Rissweite und für ungerissenen, hydrophobierten Beton; Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels  $s=7.5$  mm

In Tabelle 3 ist der Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  für einen hydrophobierten Standardbeton mit unterschiedlichen Eindringtiefen des Hydrophobierungsmittels sowie unterschiedlichen Rissweiten aufgeführt. Die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten  $A$  erfolgt mit den Ergebnissen der Massenzunahme (Abbildung 2–4). Die Ergebnisse sind in der 3. Spalte in Tabelle 3 aufgeführt.

#### 4 Diskussion

Es zeigt sich, dass das Aufsaugverhalten von hydrophobiertem Beton mit Rissen massgebend von der Rissweite und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels beeinflusst wird. In Abbildung 5 und 6 ist der Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  als Funktion der Rissweite  $w$  und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels  $s$  dargestellt. Für die mathematische Abhängigkeit des Transportkoeffizienten von der Rissweite und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels wird ein Exponentialgesetz in einer ersten Näherung zugrunde gelegt.



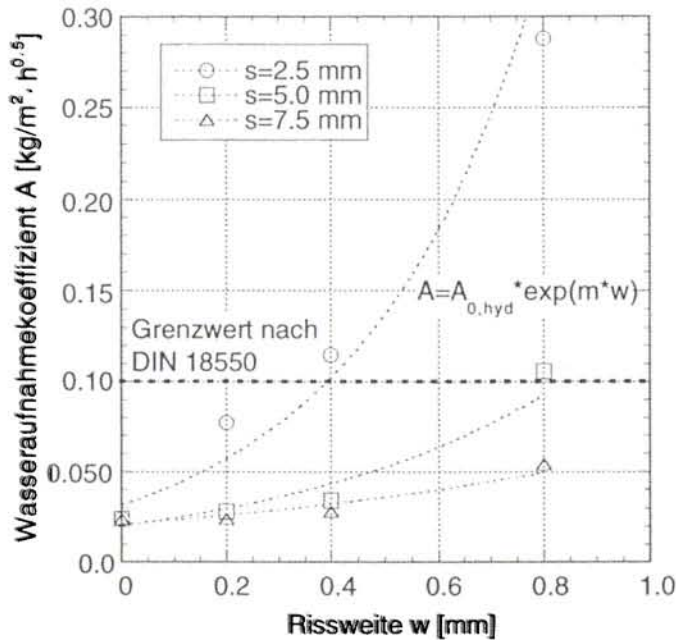
**Abbildung 4:** Wasseraufnahme als Funktion der Zeit für hydrophobierten Beton mit Biege- und ungerissenen unterschiedlicher Rissweite und für ungerissenen, hydrophobierten Beton; Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels  $s = 5,0$  mm

**Tabelle 3:** Zusammenstellung der Wasseraufnahmekoeffizienten für einen hydrophobierten Standardbeton mit unterschiedlichen Eindringtiefen des Hydrophobierungsmittels sowie unterschiedlichen Rissweiten

Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels $s$ [mm]	Rissweite des Biegerisses am äusseren Rand $w$ [mm]	Wasseraufnahmekoeffizient $A$ [kg/(m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> )]
2.5	0	0.024
	0.2	0.078
	0.4	0.116
	0.8	0.288
5.0	0	0.023
	0.2	0.028
	0.4	0.032
	0.8	0.106*
7.5	0	0.023
	0.2	0.024
	0.4	0.028
	0.8	0.053

\* Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde aus dem Zeitbereich 8 bis 24 Stunden berechnet.





**Abbildung 5:** Wasseraufnahmekoeffizient als Funktion der Rissweite für hydrophobierten Beton mit unterschiedlichen Hydrophobierungstiefen

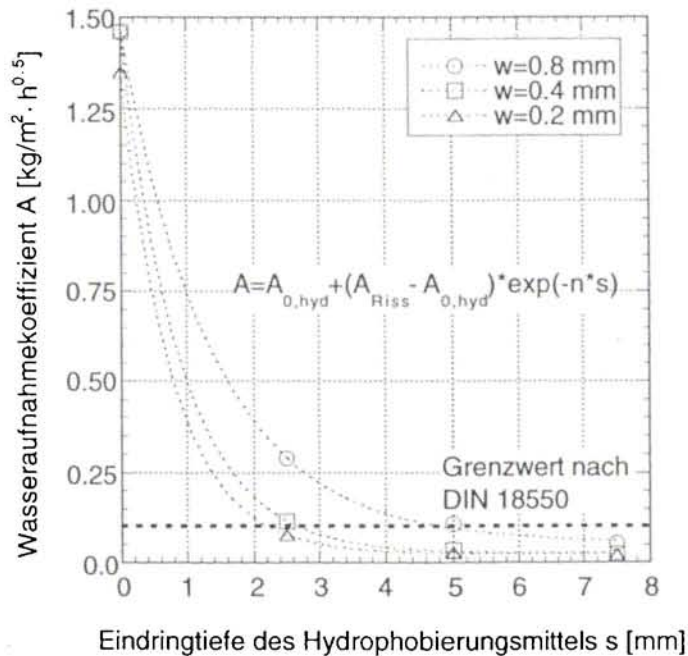
Es gilt:

$$A = A_{0,hyd} \cdot e^{m \cdot w} \quad (1)$$

$$A = A_{0,hyd} + (A_{Riss} - A_{0,hyd}) \cdot e^{(-n \cdot s)} \quad (2)$$

Dabei ist in Gl. (1)  $A_{0,hyd}$  der Wasseraufnahmekoeffizient des ungerissenen, hydrophobierten Betons,  $m$  ein Abweichungskoeffizient und in Gl. (2)  $A_{Riss}$  der Wasseraufnahmekoeffizient des gerissenen, nicht hydrophobierten Betons,  $n$  ein Abweichungskoeffizient. Zusätzlich ist der Grenzwert für den Wasseraufnahmekoeffizienten gemäss DIN 18550 [17] eingezeichnet. Anstrichstoffe mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten  $A < 0.1 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$  werden als wasserundurchlässig eingestuft.

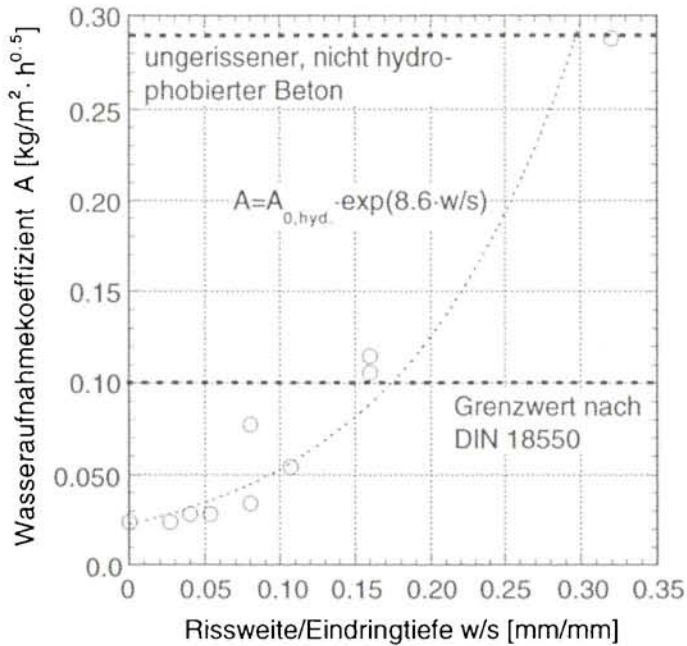
Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass bei geringen Eindringtiefen des Hydrophobierungsmittels und bei grossen Rissweiten die ursprüngliche Schutzfunktion einer Hydrophobierung gegenüber dem Eindringen von Wasser nicht mehr gegeben ist. Über den betrachteten Zeitraum von 24 Stunden ist demnach eine Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von  $s = 2.5 \text{ mm}$  bei Rissen im Beton nicht ausreichend, um langfristig eine Wasserinfiltration zu verhindern. Beton mit grossen Rissweiten von  $w = 0.8 \text{ mm}$  in einer hydrophobierten Betonoberfläche kann unabhängig von der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels dauerhaft einer



**Abbildung 6:** Wasseraufnahmekoeffizient als Funktion der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels für Beton mit Biegerissen unterschiedlicher Rissweite.

kapillaren Wasseraufnahme nicht standhalten. Der Grenzwert für den Wasseraufnahmekoeffizienten von  $A < 0.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$  nach DIN 18550 gilt dabei nur als grober Anhaltswert, insbesondere für Anstrichstoffe. In der Praxis hat sich für Hydrophobierungen ein Wasseraufnahmekoeffizient  $A = 0.050 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$  als Grenzwert durchgesetzt. Wird dieser Wert zugrunde gelegt, kann bei einer ausreichenden Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von mehreren Millimetern und bis zu einer Rissweite von  $w < 0.2 \text{ mm}$  die kapillare Wasseraufnahme analog eines ungerissenen, hydrophobierten Betons wirkungsvoll unterbunden werden.

Die kapillare Saugfähigkeit von gerissenen Betonbauteilen wird demnach im wesentlichen von der Hydrophobierungstiefe sowie einer davon abhängigen, „überbrückbaren“ Rissweite beeinflusst. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Abbildungen 5 und 6 zusammengefasst dargestellt, um den Einfluss beider Parameter auf die kapillare Wasseraufnahme quantitativ zu beschreiben. Dazu wurde der Wasseraufnahmekoeffizient  $A$  als Funktion des Quotienten aus der Rissweite  $w$  und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels  $s$  dargestellt.



**Abbildung 7:** Wasseraufnahmekoeffizient als Funktion des Quotienten aus der Rissweite und der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels

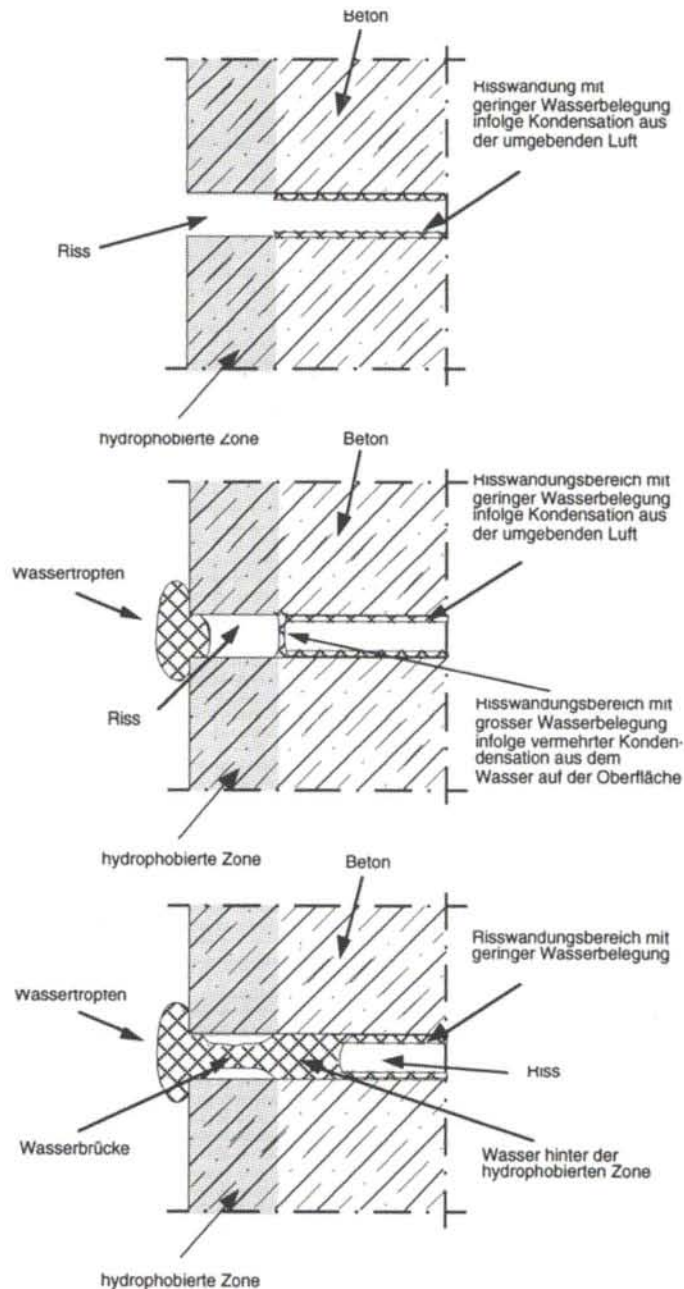
Für die mathematische Beschreibung wird ebenfalls ein Exponentialgesetz in einer ersten Näherung zugrunde gelegt. Es gilt:

$$A = A_{0,\text{hyd}} \cdot e^{8.6 \cdot w/s} \quad (3)$$

Dabei ist in Gl. (3)  $A_{0,\text{hyd}}$  der Wasseraufnahmekoeffizient des ungerissenen, hydrophobierten Betons und der Funktionsparameter 8.6 ein Abweichungskoeffizient, welcher sich durch Regression aus den experimentellen Werten ergibt. Es zeigt sich, dass das Werkstoffverhalten mit diesem Ansatz gut beschrieben werden kann. Zusätzlich ist wiederum der Grenzwert für den Wasseraufnahmekoeffizienten gemäss DIN 18550 eingezeichnet.

In Abbildung 8 ist die kapillare Wasseraufnahme eines gerissenen, hydrophobierten Betons schematisch dargestellt. Die Feuchtigkeitsaufnahme von hydrophobierten Proben mit Rissen kann in zwei Transportmechanismen – Wasserdampfdiffusion und Kapillartransport – unterschieden werden. Werden die experimentellen Untersuchungen näher analysiert, können dabei drei Teilprozesse beobachtet werden:

- Teilprozess 1 (Abbildung 8, oben):  
Der hydrophobierte und gerissene Beton steht in Kontakt mit der umge-



**Abbildung 8:** Schematische Darstellung der kapillaren Wasseraufnahme von gerissenem, hydrophobiertem Beton

benden Luft. Es stellt sich ein Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt ein. In Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit bildet sich dabei ein mehrere Moleküllagen dicker Wasserfilm auf der Oberfläche der nicht hydrophobierten Risswandungen, d.h. der "inneren" Oberflächen hinter der hydrophobierten Zone.

- Teilprozess 2 (Abbildung 8, Mitte):  
Der hydrophobierte und gerissene Beton kommt in Kontakt mit flüssigem Wasser. Durch die Hydrophobierung der Oberfläche kann das Wasser nicht unmittelbar in den Riss eindringen. Das Wasser auf der Oberfläche verursacht jedoch einen vermehrten Wasserdampftransport, welcher zu einer grösseren Kondensation und damit Wasserbelegung hinter der hydrophobierten Zone führt. Mit zunehmender Zeit wird die Menge des angelagerten Wassers grösser und es bildet sich ein geschlossener Wasserfilm hinter der hydrophobierten Zone aus.
- Teilprozess 3 (Abbildung 8, unten):  
Der geschlossene Wasserfilm hinter der hydrophobierten Zone wächst weiter und dehnt sich in Richtung der Betonoberfläche aus. In Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels kommt es dann zu einem Zusammenschluss des Wasserfilms hinter der hydrophobierten Zone und der äusseren Lösung. Dabei bildet sich eine „Wasserbrücke“ aus. Die saugfähigen, „inneren“ Oberflächen der Risswandungen sind jetzt in direktem Kontakt mit Wasser, wodurch das kapillare Saugen einsetzt.

## 5 Folgerungen

Die vorgestellten Ergebnisse sind Bestandteil eines sehr umfangreichen Forschungsvorhabens zum kapillaren Wasser- und Ionentransport in ungerissenem und gerissenem Beton sowie deren Beeinflussung durch oberflächentechnologische Massnahmen. Dabei lassen sich hinsichtlich des Einflusses von Rissen auf den kapillaren Wassertransport in hydrophobiertem Beton folgende praktische Folgerungen für das Planen von Neubau- und Instandsetzungsmassnahmen ableiten:

- Risse in hydrophobiertem Beton müssen hinsichtlich der kapillaren Saugfähigkeit separat betrachtet werden.
- Es existiert eine „kritische“ Rissweite in Abhängigkeit von der Hydrophobierungstiefe, welche zu einem partiellen Versagen der hydrophobierenden Wirkung führt. Dazu wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten und dem Verhältnis aus Rissweite zu Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels ermittelt.



- Praxisübliche Eindringtiefen des Hydrophobierungsmittels von 2-3 mm können einen kapillaren Wasser- und Salztransport in gerissenen Beton mit Rissweiten grösser als 0.2 mm nicht langfristig und dauerhaft verhindern.
- Neue Hydrophobierungsmittel [18] und neue Applikationstechniken [19], welche zu Eindringtiefen des Hydrophobierungsmittels von 5-6 mm führen, sind in der Praxis insbesondere bei chloridbelasteten Betonbauteilen anzuwenden.

## 6     **Verdankung**

Die finanziellen Mittel für dieses Forschungsvorhaben wurden in dankenswerter Weise vom Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, im Rahmen des Programmes zur Brückenunterhaltsforschung zur Verfügung gestellt.

## 7     **Literatur**

- [1] De Vries J. and Polder R.B.: *Hydrophobic Treatment of Concrete*, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 2 (1996), 145-160
- [2] Hassan K.E.-G. and Cabrera, J.G.: *Protection of Concrete against Chloride Penetration using Water Repellent Surface Treatments*, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 2 (1996), 161-177
- [3] Giudici I, Gerdes A. und Wittmann, F.H.: *Einfluss einer Hydrophobierung auf das Eindringverhalten von Chloridlösungen in Beton*, F.H. Wittmann und A. Gerdes (Hrsg.), 4. Int. Kolloquium für Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Esslingen (1996), 317-334
- [4] Hassan K. and Cabrera J.G.: *Short and long term performance of silane treated concrete*, F.H. Wittmann, T. Siemens, and L. Verhoet (ed.), Surface treatment of building materials with water repellent agents, Delft (1995)
- [5] Sasse H.R.: *Hydrophobierungen.*, in Sachstandsbericht: *Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen*, Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 443, Beuth Verlag, Berlin (1994)
- [6] Wittmann F.H. und Müller T.: *Beständigkeit einer Hydrophobierung, Ergebnisse einer Bestandsaufnahme*, Eidgenössisches Departement des Innern, Bundesamt für Strassenbau, Heft 523, Bern (1996) SIA-Norm 162/5: *Erhaltung von Betontragwerken*, Zürich (1997)
- [7] ENV 1504-9:1997: *Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Definitions, Requirements, Quality Control and Evaluation of Conformity - Part 9: General Principles for the Use of Products*

- and Systems*, European Committee for Standardisation (CEN), Brüssel (1997)
- [8] Schmid M.: *Erfahrungen mit Hydrophobierungen an Stahlbetonbauwerken ausgewählte Beispiele*, in A. Gerdes (Hrsg.), *Hydrophobieren - Grundlagen und Anwendung*, WTA-Schriftenreihe, Heft **10** (1996), 75-98
- [9] Franke L. und Bentrup, H.: *Einfluss von Rissen auf die Schlagregensicherheit von hydrophobiertem Mauerwerk und Prüfung der Hydrophobierbarkeit*, *Bautenschutz + Bausanierung*, **14** (1991), 98-101 und 117-121
- [10] Sandin K.: *Surface Treatment with Water Repellent Agents*, Proceedings of the First International Symposium on Surface Treatment of Building Materials with Water Repellent Agents, Delft, November 9<sup>th</sup> and 10<sup>th</sup>, 1995
- [11] Gislason R.S.: *Water Repellents: Protection of Facades of Concrete in a Wet Climate*
- [12] Wittmann F.H.; Lunk, P. and Müller, T.: *Feuchtigkeits- und Ionentransport bei gerissenen Stahlbetonbauteilen*, Eidgenössisches Departement des Innern, Bundesamt für Strassenbau, in Vorbereitung
- [13] Lunk P. and Wittmann F.H.: *The Behaviour of Cracks in Concrete Structures Treated with a Water Repellent Agent with Respect to Capillary Water and Salt Transport*, in F.H. Wittmann (ed.), *Water Repellent Treatment of Building Materials*, Aedificatio Publishers (1998), 63-75
- [14] Lunk P.: *Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton*,
- [15] Dissertation, ETH Zürich, Building Materials Report, Nr. **8**, Aedificatio Verlag, Freiburg (1997)
- [16] DIN 52617: *Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Baustoffen*, Berlin, (Mai 1987)
- [17] DIN 18550: *Putz, Begriffe und Anforderungen*, Berlin, (Januar 1985)
- [18] Hager R.: *The Revolution in Concrete Protection – Impregnation with Cream*, in F.H. Wittmann (ed.), *Water Repellent Treatment of Building Materials*, Aedificatio Publishers (1998), 205-216
- [19] Gerdes A; Meier S. and Wittmann F.H.: *New Application Technology for Water Repellent Surface Treatment*, in F.H. Wittmann (ed.), *Water Repellent Treatment of Building Materials*, Aedificatio Publishers (1998), 217-230

